

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

БАРАНЮК РОМАН АНДРІЙОВИЧ



УДК 621.314

**СИСТЕМИ ТЕПЛОВОГО ЗАХИСТУ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ-2017

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент
Тодоренко Віктор Агафонович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
доцент кафедри промислової електроніки

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
Денисов Юрій Олександрович,
Чернігівський національний технологічний університет
завідувач кафедри промислової електроніки,

– кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Шоповал Іван Андрійович,
Інститут електродинаміки
Національної академії наук України
старший науковий співробітник відділу перетворення
та стабілізації електромагнітних процесів №1

Захист відбудеться «12» грудня 2017 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.19 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (КПІ ім. Ігоря Сікорського) за адресою: 03056, Київ-56, пр. Перемоги, 37, корп. 12, ауд. 412.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці КПІ ім. Ігоря Сікорського за адресою:
03056, Київ-56, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «10» листопада 2017 р.

В.о. ученого секретаря
спеціалізованої вченої ради



М.Ю. Артеменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогоднішній день серед найбільш актуальних проблем сигової електроніки є мінімізація габаритів та забезпечення надійності напівпровідникових перетворювачів електроенергії. Зменшення габаритів напівпровідникових приладів обумовлює підвищення теплового опору між кристалом та навколишнім середовищем, що ускладнює передачу тепла під час швидких процесів, внаслідок чого електронні компоненти стають більш чутливими до стрибків по струму і напрузі та теплових ударів.

Майже 60% виходів з ладу пристроїв перетворювальної техніки пов'язані з перегрівом. При цьому на кожні 10° С підвищення температури інтенсивність виходів з ладу подвоюється.

Для того щоб забезпечити безаварійність роботи перетворювача, необхідно визначати та використовувати допустимі електромагнітні та теплові режими роботи. Теорії синтезу та моделювання електромагнітних процесів у перетворювачах та регулюванням перетворювачів присвячені роботи таких вчених як член-кореспондентів Волкова І.В., Сокола Є.І., професорів Андрієнка П.Д., Глазенко Т.О., Денисюка С.П., Долбні В.Т., Домніна І.Ф., Жемерова Г.Г., Зинов'єва Г.С., Каганова І.Л., Лабунцова В.О., Пентегова І.В., Руденко В.С., Жуйкова В.Я., Коротєєва І.Є., Сенько В.І., Стржелецького Р., Денисова Ю.О., Шаповала І.А., Харитонова С.О., Терещенко Т.О., Ямненко Ю.С.

Вирішенням питань побудови перетворювачів у системах зі зворотніми зв'язками та проблемами їх стійкості займалися такі вчені як професори Денисов О.І., Поздєєв А.Д., Шипіло В.П., Белов Г.А.

Створення теплового захисту перетворювальних пристроїв ускладнюється тим, що при використанні напівпровідникових ключів внаслідок малої теплової ємності та великого теплового опору швидко відведення теплоти від кристалів силових приладів є неможливим. Особливо небезпечними є перехідні режими під час повторного ввімкнення перетворювача, при яких нагрітий прилад зі зниженими граничними значеннями параметрів отримує теплові удари. Дані процеси необхідно моделювати, розраховуючи суміщені електротеплові процеси пристрою, обираючи елементи схеми так, щоб пом'якшити теплові удари і нормалізувати характер перехідного процесу при включенні нагрітого перетворювача. Аналізом теплових процесів в установленому режимі роботи займалися такі вчені як Fabis P.M., Du B., Leuca T.

Дані методи добре підходять для теплового моделювання та забезпечення теплового захисту в сталих режимах роботи перетворювача. При цьому теплові удари в кристалі напівпровідникових приладів у моменти ввімкнення пристрою, а особливо при повторно-короткочасному режимі роботи, не можуть розраховуватися даними методами, що є їх істотним недоліком. Для точного моделювання перехідних електротеплових процесів необхідно розділити електричну і теплову складові моделі, так як при спільному розрахунку

короткочасних електромагнітних процесів і довготривалих теплових процесів буде накопичуватися похибка моделювання. Теплові моделі, які розраховані методом кінцевих елементів для перехідних процесів, було розглянуто такими вченими як Drofenik U., Merrikh A. A., Malyna D.

Проблематиці теплових ударів по кристалу напівпровідникових приладів та перегріву напівпровідникових приладів, аналізу електротеплових процесів МОН-транзисторів, розрахунку схем теплозаміщення присвячені роботи інженерів фірми Infineon: Divins D., Schutze T..

Методи електротеплового моделювання, які можна застосувати для повторно-короткочасних режимів роботи імпульсних перетворювачів, не враховують багатьох чинників, наприклад, температурні залежності параметрів магнітних матеріалів, вплив струму ланцюга, теплове поле пристрою тощо. Тому проблема розробки методу розрахунку електротеплових процесів для забезпечення теплового захисту імпульсних перетворювачів, застосування якого можливо як в сталих, так і повторно-короткочасних режимах роботи пристрою та створення на основі цього систем теплового захисту є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» на кафедрі промислової електроніки в рамках держбюджетної ініціативної науково-дослідницької роботи «Підвищення показників енергоефективності та ресурсозбереження засобами силової електроніки для технології отримання високонадійних зварюваних з'єднань різнорідних матеріалів», № державної реєстрації 0116U006924, відповідно до пріоритетного тематичного напрямку наукових досліджень і науково-технічних розробок України 3. Енергетика та енергоефективність.

Мета і завдання досліджень. Метою даної роботи є розробка систем теплового захисту ключових напівпровідникових перетворювачів електроенергії на основі аналізу суміщених електромагнітних та теплових перехідних та установлених режимів роботи, що забезпечують допустимі межі електротеплових процесів.

Дана мета досягається суміщенням розглядом електромагнітних та теплових процесів у ключових напівпровідникових перетворювачах електроенергії, аналізом коренів характеристичного рівняння системи та перехідних процесів зміни струму в напівпровідникових ключах та відповідних теплових ударів по їх кристалах для визначення можливих граничних режимів роботи. На підставі такого розгляду визначено шляхи зменшення теплових ударів та запропоновано відповідні засоби теплового захисту, які базуються на установленні температурної залежності параметрів пристроїв плавного пуску та коригуванні параметрів пасивних компонентів відповідно до зміни температури з врахуванням зниження граничних значень струму ключових елементів перетворювачів.

Для досягнення мети в роботі вирішено такі задачі:

- проаналізовано існуючі методи розрахунку електромагнітних та теплових режимів роботи перетворювачів.

- створено математичну модель напівпровідникових перетворювачів з врахуванням температурної залежності параметрів пасивних компонентів та розділенням залежної та незалежної від температури складових електромагнітних процесів.

- досліджено вплив зміни параметрів пасивних компонентів схеми внаслідок нагріву на хід перехідного процесу та теплові удари по кристалу напівпровідникових приладів.

- розроблено та промодельовано пристрої теплового захисту методами адаптивного плавного пуску та стабілізації пускового перехідного процесу.

Об'єктом дослідження є електромагнітні та теплові процеси в ключових напівпровідникових перетворювачах електроенергії.

Предметом дослідження є засоби забезпечення допустимих електромагнітних та теплових режимів роботи ключових напівпровідникових перетворювачів електроенергії.

Методи дослідження. При розв'язанні поставлених у роботі завдань для створення системи теплового захисту імпульсних перетворювачів електроенергії використано чисельні методи, теорію електричних кіл та метод різницевого рівнянь; для створення математичних моделей електротеплових процесів використано диференційні рівняння стану системи при розв'язку яких застосована матрична експонента та проведено аналіз характеристичних коренів матриці за умови теплової зміни параметрів її компонентів. Математичні розрахунки виконані на персональному комп'ютері з використанням математичного пакету MATLAB та програми MuPAD, математичне моделювання проводилось за допомогою створення скриптів MATLAB, комп'ютерне моделювання проводилось за допомогою програмних пакетів MATLAB/Simulink та Plescs. Попередній вибір активних компонентів перетворювача проводився за допомогою онлайн симулятора теплових процесів фірми виробника Infineon на офіційному сайті компанії.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному.

1. На основі диференційних рівнянь стану побудована математична модель понижуючого широтно-імпульсного перетворювача з урахуванням температурних залежностей зміни параметрів компонентів напівпровідникових перетворювачів, що дало можливість проводити об'єднаний розрахунок електромагнітних та теплових процесів.

2. На базі сформованої математичної моделі запропоновано розділення компонентних матриць, що дозволяє розраховувати електромагнітні процеси при базовій температурі 25°C, відокремивши складову перехідного процесу залежну від температури та оцінити її вплив на режими роботи.

3. Вперше на основі аналізу впливу температури на корені характеристичного рівняння системи визначено шляхи нормалізації електромагнітних процесів до зміни температури, що дало можливість

запропонувати два типи засобів теплового захисту: зі зміною сталої часу пристрою плавного запуску у залежності від температури та з адаптацією параметрів пасивних компонентів.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Запропонована методика суміщеного розрахунку електромагнітних та теплових процесів у ключових напівпровідникових перетворювачах електроенергії дозволяє визначати граничні режими експлуатації та проводити вибір компонентів з врахуванням температурної залежності їх параметрів, що зменшує можливість виникнення аварійних режимів роботи.

2. Проведене моделювання електромагнітних та теплових процесів у понижуючому широтно-імпульсному перетворювачі (ШПП) підтвердило необхідність використання засобів теплового захисту перетворювачів, що дає можливість нормалізувати теплові удари по кристалах напівпровідникових приладів.

3. Проведене моделювання суміщених електромагнітних та теплових процесів у понижуючому ШПП із запропонованою системою повторного плавного пуску з врахуванням температурного режиму роботи показало можливість зменшення теплового удару по кристалу транзистора від 180°C до 80°C.

4. Моделювання суміщених електромагнітних та теплових процесів у понижуючому ШПП із системою теплового захисту, що базується на нормалізації параметрів пасивних компонентів при зміні температури показало можливість зменшення теплового удару по кристалу транзистора від 210°C до 85°C.

5. Результати моделювання суміщених електромагнітних та теплових процесів у понижуючому ШПП підтвердили доцільність використання запропонованих систем теплового захисту, які суттєво зменшують теплові удари по кристалах транзистора в пускових та повторно короткочасних режимах роботи.

Особистий внесок здобувача. Викладені в дисертаційній роботі наукові положення та результати отримані автором особисто. Автору належать обґрунтування задачі, проведення досліджень, аналіз і обробка результатів, висновки за отриманими результатами роботи, а саме: формування суміщеної електротеплової моделі напівпровідникових перетворювачів електроенергії для забезпечення теплового захисту пристрою на методологічному рівні та створення додаткових ланцюгів схеми перетворювача для забезпечення теплового захисту пристрою на схемотехнічному рівні. Роботи [3, 6, 7] написані автором дисертації особисто. У роботах, опублікованих із співавторами, дисертанту належать [2, 8] – створення рівнянь стану перетворювачів з врахуванням впливу температури на параметри пасивних компонентів, [1] – суміщене моделювання понижуючого ШПП в пакеті MATLAB/Simulink, [4, 5] – суміщене електротеплове моделювання та створення пристроїв теплового захисту імпульсних напівпровідникових перетворювачів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях: «ТРАНСЕЛЕКТРО» 2014, 2015 рр.; «Smart-технології в енергетиці та електроніці» 2016 р.; «Сучасні інформаційні та електронні технології» 2017 р.

Публікації. Основний зміст роботи відображено у 8 публікаціях: 5 статей у наукових фахових виданнях України, з них 3 статті у виданнях України, включених до міжнародних наукових баз; 1 патент на корисну модель; 2 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку та списку використаних джерел із 95 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 150 сторінок, у тому числі 121 сторінка основного тексту, 58 рисунків та 8 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі наукового дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, викладено наукову новизну і практичне значення результатів досліджень, визначено особистий внесок здобувача, наведені дані про апробацію результатів роботи і публікації.

У **першому розділі** виконано аналітичний огляд науково-технічної літератури з предмету дослідження, розглянуто методику розрахунку електромагнітних та теплових режимів роботи, моделі ключових та пасивних компонентів перетворювачів, аварійно-небезпечні режими роботи напівпровідникових перетворювачів електроенергії.

Під час пуску перетворювача або при повторно-короткочасних режимах роботи, виникнення аварійних режимів в основному обумовлене напівпровідниковими приладами. Внаслідок значного теплового опору між кристалом і корпусом та малої теплової ємності кристалів спостерігається сплеск температури переходів напівпровідника. Температура кристалу напівпровідникового приладу може суттєво перевищувати температуру корпусу. При запуску перетворювача нагрів кристалу може досягти граничних значень при незначній зміні температури корпусу. На рис. 1. зображено тепловий перехідний процес на кристалі MOSFET-транзистора, який працює в ключовому режимі роботи з навантаженням ємнісного типу при незмінній температурі корпусу і тепловідводу рівній 50°C.

Наявним є тепловий удар по кристалу із сплеском та подальшим зменшенням його температури. Сплеск температури обумовлений двома факторами – формою характеристики зміни струму транзистора та його термічними параметрами, а саме тепловими опорами перехід-корпус, корпус-радіатор (або перехід-навколишнє середовище) та тепловими ємностями кристалу, корпусу, радіатора.

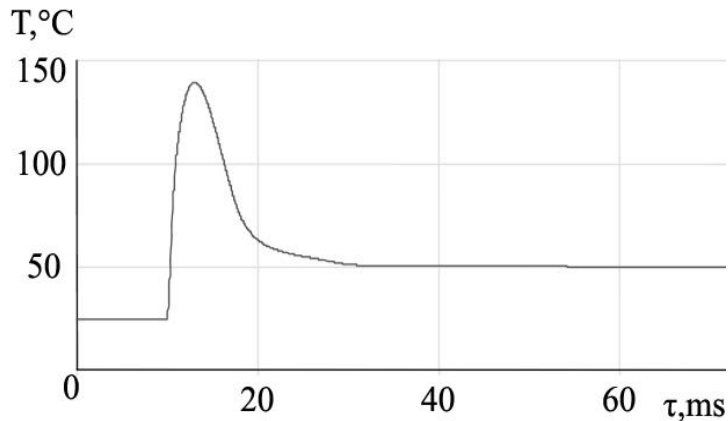


Рис. 1

Задачею даної роботи є створення системи теплового захисту, яка передбачає як проведення розрахунків, що визначають критичні електричні та теплові режими роботи активних елементів перетворювачів, так і розробку спеціалізованих вузлів захисту.

Огляд моделей ключів визначив придатні для використання при моделюванні електротеплових режимів роботи перетворювачів моделі $R(T)S$, $R(I,T)$ типу. Відповідний огляд моделей пасивних компонентів визначив доцільність вживання моделей реактивних компонентів перетворювачів $L(T)$, $L(I,T)$, $C(T)$, $C(U,T)$ типу.

Особливістю моделювання перетворювачів з врахуванням теплової зміни параметрів компонентів є необхідність проведення сумісного розгляду електромагнітних та теплових процесів. Огляд існуючих методів розрахунку показав, що внаслідок суттєвої жорсткості системи диференціальних рівнянь доцільно використовувати метод діакоптики. Проте зазвичай цей метод використовувався для розгляду систем із сталими параметрами компонентів, що потребує додаткових досліджень для його застосування в системах, де параметри компонентів змінюються.

Проведено також аналіз існуючих засобів теплового захисту перетворювачів.

У другому розділі розглянуто питання формування моделей реактивних компонентів, залежних від температури. На основі рівнянь стану системи побудована суміщена математична модель електромагнітних та теплових процесів. Проведено дослідження стійкості розрахункового процесу.

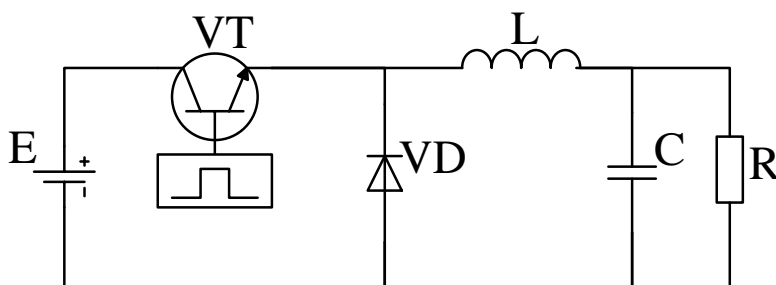


Рис. 2

Для понижуючого широтно-імпульсного перетворювача (рис. 2) при використанні моделей реактивних компонентів, незалежних від температури, рівняння стану системи для електромагнітних процесів має вигляд:

$$\begin{vmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{du_C}{dt} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_L \\ u_C \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{E \cdot s}{L} \\ 0 \end{vmatrix},$$

де $r = r_{VT} \cdot s + r_{VD} \cdot (1-s) + r_L$, s – функція перемикання.

Суміщені рівняння стану системи з врахуванням теплових процесів та теплової зміни параметрів компонентів мають наступний вигляд:

$$\begin{vmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{du_C}{dt} \\ \frac{dT_{VT}}{dt} \\ \frac{dT_{VD}}{dt} \\ \frac{dT_L}{dt} \\ \frac{dT_C}{dt} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\frac{r(T_{VT}, T_{VD}, T_L)}{L(T_L)} & -\frac{1}{L(T_L)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C(T_C)} & -\frac{1}{RC(T_C)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_{thjCVT}C_{thjCVT}} & -\frac{1}{R_{thVDVT}C_{thjCVT}} & -\frac{1}{R_{thLVT}C_{thjCVT}} & -\frac{1}{R_{thCVT}C_{thjCVT}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_{thVTVD}C_{thjCVD}} & -\frac{1}{R_{thjCVD}C_{thjCVD}} & -\frac{1}{R_{thLVD}C_{thjCVD}} & -\frac{1}{R_{thCVD}C_{thjCVD}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_{thVTL}C_{thL}} & -\frac{1}{R_{thVDL}C_{thL}} & -\frac{1}{R_{thL}C_{thL}} & -\frac{1}{R_{thCL}C_{thL}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_{thVTC}C_{thC}} & -\frac{1}{R_{thVDC}C_{thC}} & -\frac{1}{R_{thLC}C_{thC}} & -\frac{1}{R_{thC}C_{thC}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_L \\ u_C \\ T_{VT} \\ T_{VD} \\ T_L \\ T_C \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{E \cdot s}{L} \\ 0 \\ \frac{Q_{VT}}{C_{thjCVT}} \\ \frac{Q_{VD}}{C_{thjCVD}} \\ \frac{Q_L}{C_{thL}} \\ \frac{Q_C}{C_{thC}} \end{vmatrix},$$

де значення r , L , C залежать від температури, значення по основній діагоналі матриці – тепловий опір та ємність компонентів, значення R_{th} – тепловий опір між компонентами схеми. Вигляд блоку компонентної матриці, що відповідає тепловій складовій, залежить від використаної моделі теплообміну. При моделюванні пристроїв відкритого типу або з примусовою вентиляцією можна знехтувати взаємним тепловим зв'язком між компонентами. При ускладненні – можливе врахування теплового імпедансу замість теплового опору.

Для розрахунку суміщених електротеплових процесів необхідно узгоджувати вибір моделей компонентів, крок інтегрування та швидкістю перебігу процесів (таб. 1).

Таблиця 1

		Швидкі	Повільні
Електромагнітні процеси	Ключі	$S, R, RS, R(I)S$	—
	Пасивні компоненти	$LC, L(I)C(U)$	—
Теплові процеси	Ключі	$R(T_j)$	$R(T_{cs})$
	Пасивні компоненти	—	$L(T)C(T)$
Електротеплові процеси	Ключі	$R(T_j)S, R(T_j, I)S$	$R(T_{cs})S$
		$R(T_j, T_c)S, R(T_j, T_c, I)S$	
	Пасивні компоненти	—	$L(T(P))C(T(P))$
		$L(T(P), I)C(T(P), I)$	

В роботі використано суміщену модель з різною швидкістю перебігу процесів $R(T_j, T_c)S$, $L(T)$, $C(T)$ з можливістю розширення до моделі $R(T_j, T_c, I)S$, $L(T, I)$, $C(T, U)$.

Диференційні рівняння стану для електротеплових процесів є жорсткими. Використовуючи метод діакоптики, сумісну систему рівнянь можна привести до наступного вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dX_1}{dt} = A_1 X_1 + B_1 \\ \frac{dX_2}{dt} = A_2 X_2 + B_2 \end{cases},$$

де перше рівняння відноситься до швидких електромагнітних процесів, друге – до повільних теплових. Рівняння зв'язку між двома системами визначають тип обміну змінними стану теплового та електромагнітного.

В даній системі рівнянь матриці коефіцієнтів та вектори зовнішнього впливу не є статичними, а залежать від температурного та електромагнітного стану системи. Тобто:

$$\begin{cases} \frac{dX_1}{dt} = A_1 \cdot X_1 + B_1 \\ \frac{dX_2}{dt} = A_2 \cdot X_2 + B_2 \end{cases},$$

$$A_1, B_1 = A_1, B_1 + f(X_2),$$

$$X_2 = X_2 + g(P_1(X_1)).$$

Дана система рівнянь являє собою діакоптично розділені блоки вихідного жорсткого рівняння та рівнянь зв'язку, які відповідають за обмін даними, де члени матриці коефіцієнтів першого рівняння залежать від температури відповідних компонентів, розрахованої в другому рівнянні, а значення потужності розсіювання другого рівняння береться за результатами першого.

Інтервал модифікації параметрів матриць коефіцієнтів та вектору зовнішнього впливу визначається в залежності від співвідношення сталих часу теплових та електромагнітних процесів або жорсткості системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dX_1}{dt} = A_1 \cdot X_1 + B_1 \\ \frac{dX_2}{dt} = A_2 \cdot X_2 + B_2 \end{cases},$$

$$A_1, B_1[nT] = A_1, B_1[(n-1)T] + \Delta A_1[X_2],$$

$$P_2[nT] = P_1(X_1[nT]).$$

При розрахунку електромагнітних процесів матриця A_1 включає залежні від температури компоненти. Можливе виділення та окремий розрахунок складових електромагнітних процесів, залежних від температури та

незалежних. Для цього компонентна матриця розділяється на незалежну від температури матрицю з статичними параметрами компонентів, значення яких відповідають температурі 25°C, та на залежну від температури матрицю компонентів з змінними параметрами:

$$\frac{dX_1}{dt} = (A_e + A_t[nT])X_1 + B_1.$$

Під час розбиття на частини диференційного рівняння стану системи для електротеплових процесів можна вважати, що рівняння зв'язку є лінійним та має вигляд як $X_1 = kX_2$.

Враховуючи дану лінійність та інертність реакції повільних теплових процесів на швидкі електромагнітні, крок зв'язку між рівняннями має відповідати тій величині, коли швидкі процеси починають значно впливати на перебіг повільних.

$$A_1[nT] = A_1[(n-1)T] + \Delta A_1(X_2[mh_2])$$

$$P_2[nT] = P_1[mh_1]$$

де h_1 – крок передачі даних з рівняння теплових процесів в рівняння електромагнітних процесів, h_2 – крок передачі даних з рівняння електромагнітних процесів в рівняння теплових процесів

На рис. 3 показано графічне зображення перебігу струму та температури та їх взаємозв'язок за допомогою складових рівнянь зв'язку.

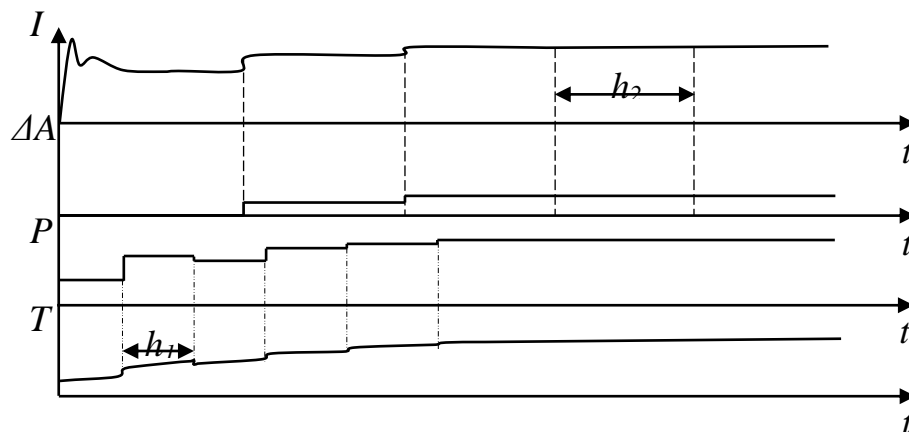


Рис. 3

Корені характеристичних рівнянь визначають коливальність та масштаб часу перехідних процесів. Для жорстких систем співвідношення коренів буде значним. Відповідно при виборі однакового кроку інтегрування для електромагнітних та теплових процесів збільшується як тривалість розрахунку (при малому кроці інтегрування), так і стійкість системи (при великому). На рис. 4 зображена зона придатних значень $h_1\mu$ та $h_2\nu$ для неявного методу Ейлера, де μ та ν – корені характеристичних рівнянь електромагнітних та теплових процесів.

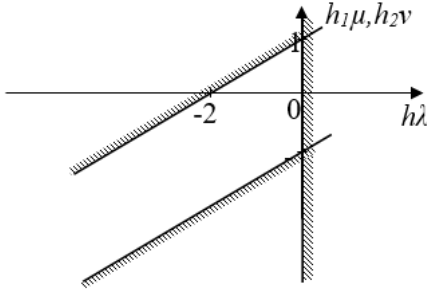


Рис. 4

У разі вибору кроку інтегрування згідно відношень $-h\lambda_{\min} + 2h\mu_{\max} < 2$, $h\lambda_{\max} - 2h\nu_{\min} < 2$ та $h\lambda < 0$ можна знайти найбільш придатний крок інтегрування:

$$\frac{h_1}{h_2} \approx \frac{\nu}{\mu} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}.$$

Зона стійкості обчислювального процесу не є сталою. Межі зони динамічно змінюються при тепловій зміні параметрів компонентів.

Відповідно змінюються і придатні кроки інтегрування та крок рівнянь зв'язку. Внаслідок цього при кожному перерахунку складової матриці A_1 , залежної від температури, необхідно визначати кроки інтегрування. Прискорення розрахункового процесу досягається двома етапами:

1. Вибором кроку рівнянь зв'язку з врахуванням чутливості на тепловий рух коренів характеристичного рівняння $\frac{S_{\lambda_i}}{\Delta T} \rightarrow 0$

2. Знаходженням зони стійкості методу інтегрування.

У третьому розділі на основі методики розрахунку суміщених електротеплових процесів проведено моделювання понижуючого ШІП.

З використанням обернених температурних моделей індуктивності дроселя та ємності конденсатора $L^* = k_\mu \mu^* = \frac{k_\mu}{\mu}$, $C^* = \frac{1}{C}$, $k_\mu = \frac{l}{\mu_\varepsilon \cdot S \cdot N^2}$ було розділено рівняння електромагнітних процесів на залежну та незалежну від температури складові:

$$A_e = \begin{vmatrix} -rL^* & -L^* \\ C^* & -\frac{C^*}{R} \end{vmatrix}, \quad A_t = \begin{vmatrix} -r((1 + \alpha T) \cdot k_\mu \Delta \mu^*(\theta) + L^* \cdot \alpha T) & -k_\mu \Delta \mu^*(\theta) \\ \Delta C^*(\theta) & -\frac{\Delta C^*(\theta)}{R} \end{vmatrix},$$

де $\mu^*(\theta_L) = a_n \theta^n + a_{n-1} \theta^{n-1} + \dots + a_1 \theta + a_0 = \Delta \mu^*(\theta_L) + \mu^*$, $C^*(\theta_C) = a_3 e^{-\theta} + a_2 \theta^2 + a_1 \theta + C^* = \Delta C^*(\theta_C) + C^*$ (рис. 5).

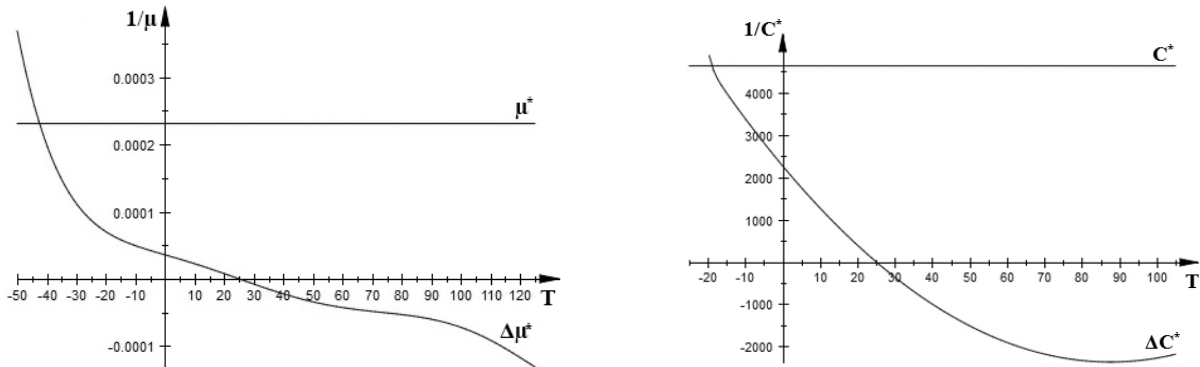


Рис. 5

Електромагнітні та теплові перехідні процеси характеризуються коренями характеристичного рівняння матриці коефіцієнтів системи $\lambda^2 + b \cdot \lambda + c = 0$.

В даному рівнянні $b = -a_{11} - a_{22} - a_{11}(T) - a_{22}(T)$, $c = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} + a_{11}(T) \cdot a_{22}(T) + a_{11}a_{22}(T) + a_{22}a_{11}(T) - a_{12}(T)a_{21}(T) - a_{12}a_{21}(T) - a_{21}a_{12}(T)$.

Якщо корені характеристичного рівняння дійсні, перехідний процес має аперіодичний характер. Даний характер не має стрибків струму або напруги, що є сприятливим при включенні нагрітого пристрою зі зниженими максимально допустимими значеннями параметрів напівпровідникових компонентів. Зростання температури на кристалах ключових елементів так само не буде стрибкоподібним.

При комплексних коренях величина коливальної складової процесу залежить від близькості коренів до уявної осі комплексної площини (рис. 6).

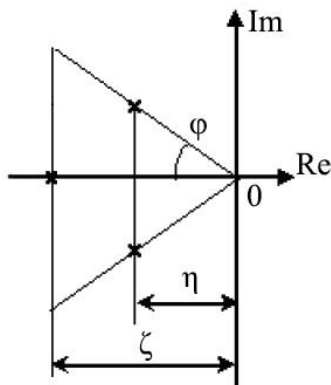


Рис. 6

η – величина мінімального дійсного кореня, яка визначає тривалість перехідного процесу, будучи величиною, обернено пропорційною часу регулювання. Дальня від уявної осі границя області ζ визначає корені, які мають гранично малий вплив на перехідний процес.

Характер та тривалість перехідного процесу залежать від відстані коренів характеристичного рівняння до уявної осі. Кут нахилу комплексно-спржених коренів до уявної осі φ розраховано як:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{Im}(\lambda)}{\operatorname{Re}(\lambda)},$$

де $\operatorname{Re}(\lambda)$ та $\operatorname{Im}(\lambda)$ реальна та уявна складові відповідно.

Змінюючи кут φ , можна змінювати характер перехідного процесу, перетворюючи його в довготривалий аперіодичний, або навпаки, при великому запасі максимально-допустимих параметрів компонентів, довготривалий процес можна трансформувати в швидкий коливальний процес.

Для зміни типу перехідного процесу за допомогою зовнішнього впливу на компоненти необхідно вибрати тип перехідного процесу та розрахувати параметри компонентів, які відповідають певним значенням коренів характеристичного рівняння. Для досягнення даної цілі використовується значення середнього геометричного коренів характеристичного рівняння $\Omega = \sqrt{\lambda_1 \lambda_2}$.

Характеристичне рівняння можна записати як:

$$\lambda^2 + \frac{b}{\Omega} \cdot \Omega \cdot \lambda + \Omega^2 = \lambda^2 + B \cdot \Omega \cdot \lambda + \Omega^2 = 0$$

В даному вигляді величина B характеризує криву перехідного процесу, а Ω – масштаб часу даного процесу $\tau = \Omega \cdot t$.

На рис. 7 наведено структуру моделі в Simulink.

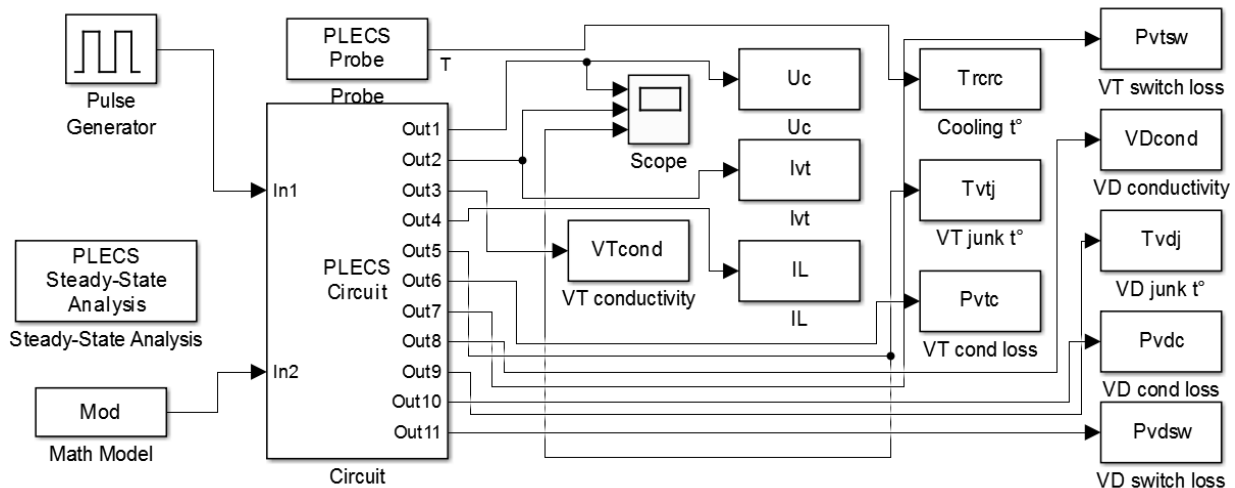


Рис. 7

Дана модель за допомогою блоку Pulse Generator передає на ключ понижуючого ШІП імпульси керування, параметри яких можуть змінюватися з робочої області MATLAB. Іншим вхідним сигналом є сигнал Mod, який є результатом розрахунків в робочій області MATLAB та відповідає за керування струмом через магнітно-зв'язану з дроселем ШІП котушку індуктивності. З іншої сторони Plects моделі – вихідні характеристики, серед яких вихідна напруга, струм через транзистор та температура кристалу транзистора, які передаються на осцилограф та для подальшого обчислення в робочу область MATLAB, струм через котушку індуктивності, температура теплопроводу та корпусу транзистора з діодом і втрати напівпровідникових приладів, які також передаються в робочу область MATLAB.

Задачею робочої області є обчислення втрат на пасивних компонентах, знаходження електромагнітних значень параметрів пасивних компонентів на даному зрізі температури, розв'язок диференціальних рівнянь стану системи відносно теплової складової (з використанням матриці A_i), знаходження характеристичних коренів та порівняння найменшої уявної складової коренів з допустимим значенням або у випадку, коли наявність коливальної складової недопустима, забезпечення дійсних характеристичних коренів без уявної складової.

В середовищі MATLAB процедура знаходження коренів характеристичного рівняння полягає в наступному. Для визначеної

компонентної матриці корені знаходяться за допомогою функції $\text{eig}(A)$. Одинична матриця другого порядку задається як $\text{eye}(2)$. Розв'язок диференційного рівняння знаходиться наступним чином:

$$X = \text{dsolve}(\text{diff}(i) = \dots, \text{diff}(u) = \dots, i(mT) = \dots, u(mT) = \dots).$$

В робочій області MATLAB також реалізоване знаходження коренів характеристичного рівняння, визначення кореня з мінімальною реальною складовою та порівняння уявної частини кореня для визначення критерію коливальності для даної схеми.

Четвертий розділ присвячений дослідженню електротеплових режимів роботи електрокоагулятора серійного виробництва та розгляду систем теплового захисту напівпровідникових перетворювачів.

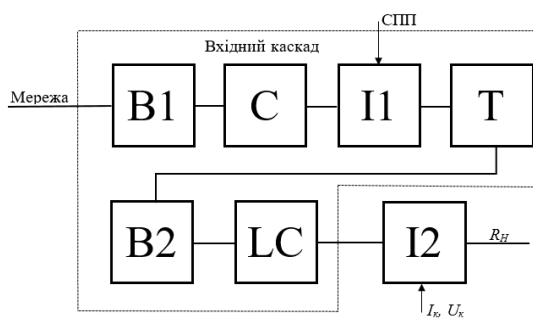


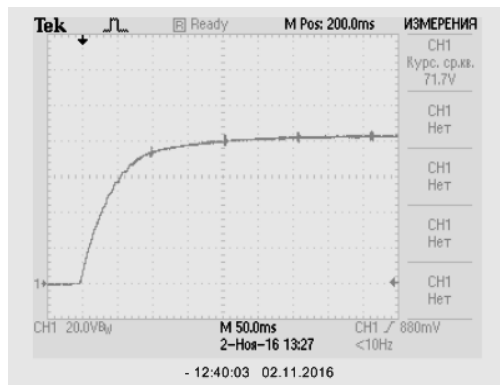
Рис. 8

З метою підвищення надійності приладів трьох сімейств електрокоагуляторів, які серійно вироблялись та знаходяться на післягарантійному обслуговуванні («Надія-2», ЕХВЧ 350М/120Б), випускаються в даний час («Надія-4», ЕХВЧ-300, 200, 120) та яке завершило етап технічних випробувань і отримало дозвіл на серійний випуск («Свармед»,

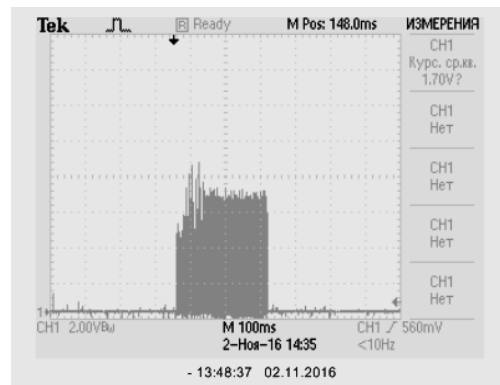
ЕК300М) було проведено дослідження аварійних електротеплових режимів роботи. Ці прилади мають спільну платформу силової частини. На рис. 8 зображено структурну схему силових частин електрокоагуляторів, яку виконано на основі дволанкового перетворювача частоти, що живлять від мережі змінного струму 220В, 50Гц та формує на виході змінну напругу частотою 440кГц. Даний пристрій складається з двох каскадів: регульованого AC/DC перетворювача, виконаного на базі напівмостового інвертора напруги I1 з системою керування та пристроєм плавного пуску (СПП), та нерегульованого DC/AC мостового інвертора I2. До складу вхідного регульованого AC/DC перетворювача входять також випрямляч B1 мережі живлення, ємнісний C-фільтр. Вихідна змінна напруга інвертора I1 випрямляється B2 та згладжується LC-фільтром. Для контролю струмів транзисторів першого та другого інверторів в схему додатково введені два низькоіндуктивних шунти, які включені послідовно зі стійками транзисторів.

Особливістю роботи електрокоагуляторів є використання повторно-короткочасних режимів роботи та режимів з неперіодичними короткими замиканнями навантаження.

Під час ввімкнення пристрою, навіть за умови забезпечення аперіодичного типу зміни напруги на ємності LC-фільтра регульованого AC/DC перетворювача напруги (рис. 9,а), спостерігався коливальний характер зміни струму транзисторів (рис. 9,б).



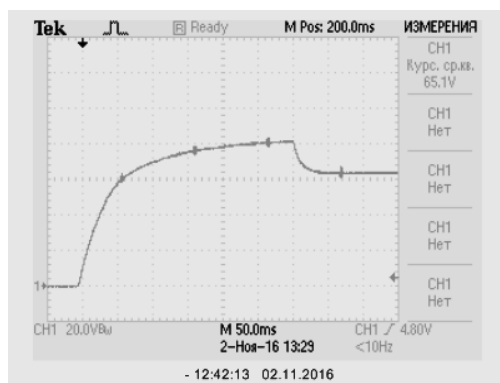
а



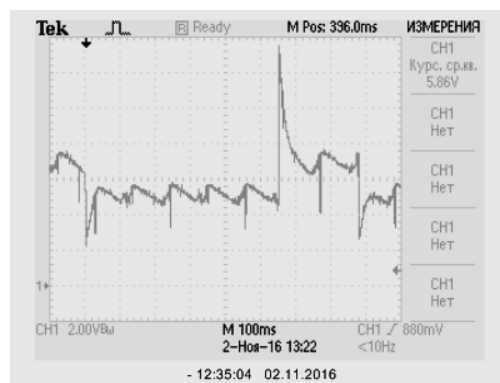
б

Рис. 9

Для другої ланки перетворювача частоти небезпечними є коротке замикання або суттєва зміна навантаження, як частковий випадок короткого замикання. На рис. 10.а зображено, як зміна навантаження приводить до зміни напруги на ємності LC-фільтру та, як наслідок цього, формується сплеск струму транзисторів другого інвертору (рис. 10.б).



а



б

Рис. 10

Наявність сплесків струму приводить до виникнення теплових ударів по кристалах транзисторів першого та другого інверторів. Задачу забезпечення одночасного електротеплового захисту в такому дволанковому перетворювачі неможливо вирішити за рахунок роздільного розгляду аварійних режимів роботи окремих інверторів. Наприклад, якщо розглядати перший інвертор, то для зменшення амплітуди сплеску струму транзисторів доцільно збільшити сталу часу перехідного процесу збільшивши номінальні значення індуктивності дроселя та ємності LC-фільтру. У разі використання режиму заряду ємності стабілізованим струмом також збільшується стала часу перехідного процесу. Проте такі заходи у другому інверторі приводять до ускладнення аварійного режиму – збільшення амплітуди сплесків струму.

У роботі проведено дослідження електротеплових режимів роботи електрокоагулятора ЕК300М. Досліджувалися екстремальні режими роботи напівпровідникових елементів. Визначені параметри компонентів LC-фільтру

та запропоновані типи магнітного матеріалу дроселя та ємності, які забезпечують допустимі стрибки струму транзисторів. Рекомендовано до використання систему плавного пуску з адаптивною сталою часу, яка обмежує стрибки струму транзисторів перетворювача напруги електрокоагулятора.

Одним з найнебезпечніших моментів в роботі силових перетворювачів є повторне ввімкнення нагрітого пристрою. Зі збільшенням температури кристалу напівпровідникових приладів зменшуються їх граничні параметри. Внаслідок даного зниження параметрів при повторному ввімкненні ступінь коливальності перехідного процесу є доволі важливим параметром, оскільки саме він може визначати аварійність даного процесу. Для зменшення стрибка температури запропонована система теплового захисту (рис. 11), дія якої основана на зменшенні коливальної складової перехідного процесу.

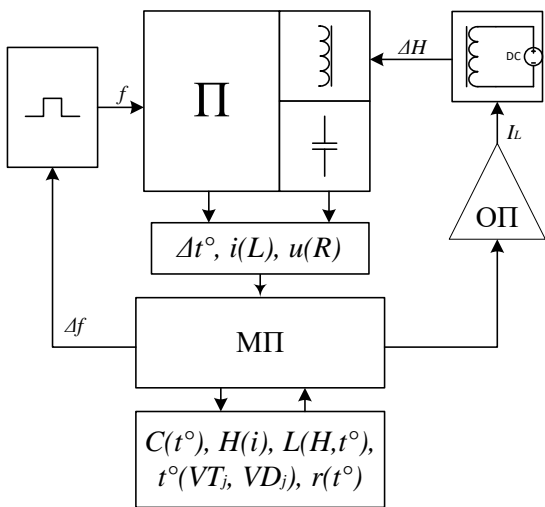


Рис. 11

Схема реалізує зворотний зв'язок перетворювача (П) по температурі на мікропроцесорі (МП) з введеними в нього тепловими моделями компонентів. Зміна індуктивності дроселя згладжувального фільтра забезпечується регулюванням струму через магнітно-зв'язану з дроселем котушку, який визначається МП та підсилюється операційним підсилювачем (ОП). Показники електромагнітних процесів коригуються також за рахунок зміни частоти перемикавання ключа перетворювача. Така

подвійна корекція забезпечує при зміні температури відповідність параметрів ключових компонентів перетворювача межах максимально-допустимих значень. Було проведено моделювання роботи схеми, яке підтвердило її ефективність. На рис. 12,а зображений струм транзистора та температура кристалу нагрітого перетворювача в режимі роботи без зовнішнього зв'язку по температурі та за наявної системи теплового захисту (рис. 12,б). Внаслідок дії системи захисту стрибок температури кристалу зменшився від 210°C до 85°C .

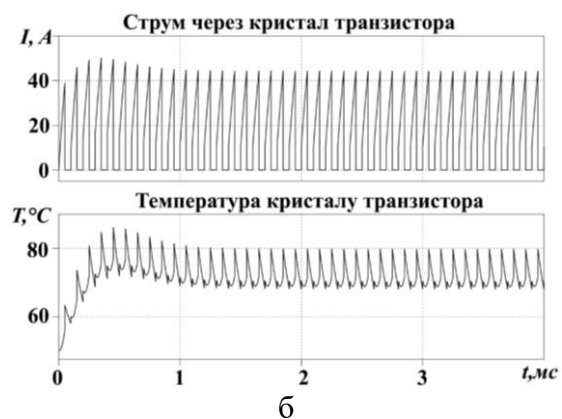
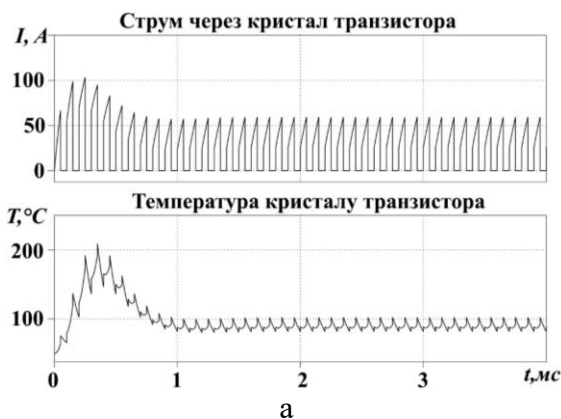


Рис. 12

Для вирішення проблеми теплових ударів по кристалам напівпровідникових приладів під час короткого замикання та накиду струму запропоновано систему перезавантаження плавного пуску після короткого замикання з корекцією сталої часу, залежною від температури компонентів (рис. 13).

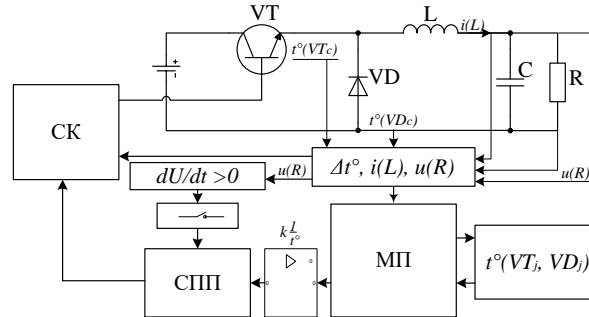


Рис. 13

Під час короткого замикання напруга на навантаженні різко знижується. Після зняття короткого замикання реєструється зростання вихідної напруги, що є сигналом для повторного запуску системи плавного пуску. Для регулювання тривалості плавного пуску використовується мікропроцесор (МП) з введеними електротепловими параметрами моделей активних компонентів. На підставі даних датчиків температури корпусів активних елементів перетворювача, струму дроселя фільтру та напруги навантаження розраховується температура кристалів напівпровідникових ключів. Сигнал з МП подається через систему плавного пуску (СПП) на систему керування (СК) задаючи тривалість плавного пуску з коефіцієнтом заповнення імпульсів, залежним від температури кристалів напівпровідникових приладів. На рис. 14,а зображено перехідний струм через кристал транзистора під час перезавантаження системи плавного пуску без теплової корекції, а на рис. 14,б – за умови адаптації тривалості плавного пуску до температури та поточного струму транзистора. Результати моделювання підтвердили можливість зменшення стрибка температури кристалу транзистора від 180°C до 85°C.

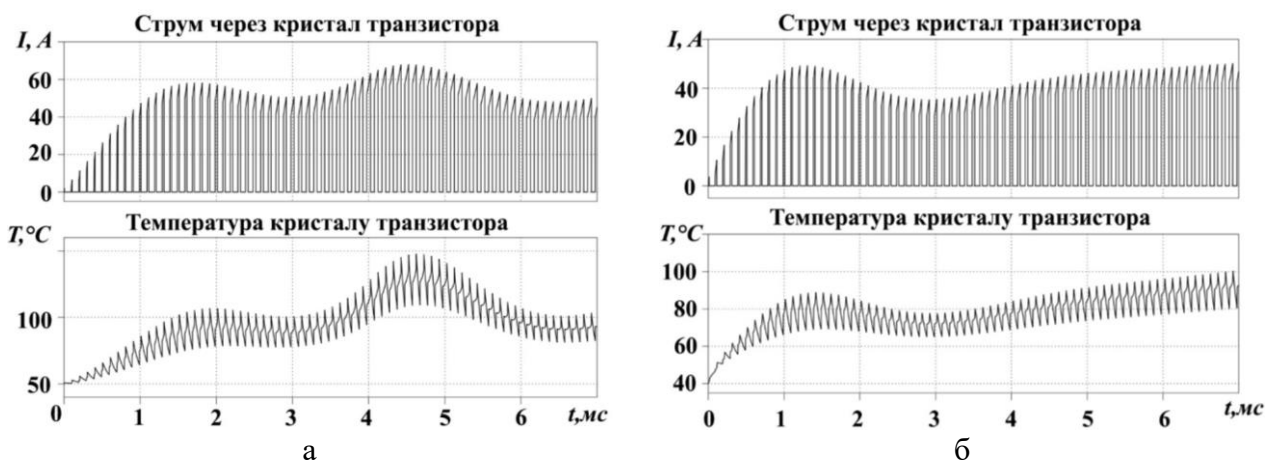


Рис. 14

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В роботі вирішена задача забезпечення теплового захисту ключових напівпровідникових перетворювачів електроенергії за рахунок проведення суміщеного аналізу електромагнітних та теплових режимів роботи та розробки на його основі пристроїв теплового захисту, які забезпечують допустимі межі електротеплових процесів.

1. Проведений огляд існуючих методів розрахунку електромагнітних та теплових режимів роботи напівпровідникових перетворювачів електроенергії вказав на необхідність проведення суміщеного аналізу електричних та теплових режимів, що дає можливість визначати граничні режими роботи напівпровідникових ключових елементів з врахуванням поточної температури активних та пасивних компонентів.

2. Створено математичну модель ключового напівпровідникового перетворювача, яка поєднує системи диференційних рівнянь, що відповідають електромагнітним та тепловим процесам, використання якої дало змогу при розрахунку електромагнітних процесів враховувати температурну зміну параметрів активних та пасивних компонентів.

3. З використанням діакоптичного розділення об'єднаної системи диференційних рівнянь, яке дало змогу розділити вихідну жорстку електротеплову систему на нежорсткі теплову та електричну, досліджено вплив зміни параметрів компонентів внаслідок нагріву на хід перехідних процесів та теплові удари по кристалам силових ключів.

4. На основі визначення зон сталості обчислювального процесу для діакоптично розділеної системи з суттєвою вихідною жорсткістю визначено придатні кроки інтегрування підсистем, що дало можливість для понижуючого широтно-імпульсного перетворювача провести об'єднаний розрахунок електромагнітних та теплових процесів з урахуванням теплової зміни параметрів компонентів.

5. На основі створеної математичної моделі ключового напівпровідникового перетворювача, яка враховує залежність від температури параметрів активних та пасивних компонентів, виділено залежну та незалежну від температури складові електромагнітних процесів, що дало можливість оцінювати вплив зміни температури компонентів на перебіг електромагнітних процесів та граничні режими роботи силових ключів.

6. Проведений аналіз впливу температури на корені характеристичного рівняння показав, що в ключових перетворювачах, які працюють спільно з вихідним згладжувальним фільтром, доцільно використовувати схемотехнічні засоби теплового захисту дія яких оснований на адаптації сталої часу системи плавного запуску до температури та на нормалізації параметрів згладжувального фільтру при зміні температури елементів.

7. Розроблені системи теплового захисту були промодельовані спільно з понижуючим ШПІ в об'єднаному середовищі PLECS/Mathlab/ Simulink.

Моделювання системи захисту з адаптацією сталої часу пристрою плавного пуску до температури показало можливість зменшення теплового удару по кристалу транзистора від 180°C до 80°C. Моделювання системи, дія якої основана на нормалізації параметрів пасивних компонентів при зміні температури, показало можливість зменшення теплового удару по кристалу транзистора від 210°C до 85°C. Результати моделювання підтверджують доцільність використання таких систем захисту в реальних пристроях. Система захисту з адаптацією плавного пуску до температури використовується в електрокоагуляційних приладах ЕК300М, що виробляються серійно.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Баранюк Р. А. Расчет переходных электромагнитных и тепловых процессов в преобразователях электроэнергии / Р. А. Баранюк, В. А. Тодоренко, О. И. Тюрютиков // Электрификация транспорта. – 2013. – №5. – С. 74-77. *Здобувачем проведено суміщене моделювання понижуючого ШПП в пакеті MATLAB/Simulink.*

2. Баранюк Р. А. Аналіз електромагнітних процесів у понижуючому широтно-імпульсному перетворювачі з врахуванням температурного режиму роботи / Р. А. Баранюк, В. А. Тодоренко // Электрификация транспорта. – 2016. – №11. – С. 8-12. *Здобувачем запропонований принцип формування рівнянь стану перетворювачів з врахуванням впливу температури на параметри пасивних компонентів.*

3. Баранюк Р. А. Теплове моделювання силових напівпровідникових пристроїв / Р. А. Баранюк // Електроніка та зв'язок. – 2016. Том. 21, – №3(92). – С. 10-16. *Здобувачем висвітлені перспективні методи електротеплового моделювання за допомогою створення еквівалентної схеми, побудови моделей в системі Simulink та поєднання пакетного середовища MATLAB з програмою, написаною мовою C++ для більш складних циклів та обчислень (включена до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus Journals Master List, РИНЦ).*

4. Баранюк Р. А. Тепловий захист імпульсних перетворювачів електроенергії / Р. А. Баранюк, В. А. Тодоренко // Електроніка та зв'язок. – 2016. Том. 21, – №5(94). – С. 66-69. *Здобувачем описується шлях до забезпечення теплового захисту напівпровідникових перетворювачів електроенергії як на методологічному рівні, встановлюючи межі безпечної роботи пристрою, так і схемотехнічному рівні, додаючи до схеми пристрою додаткові ланцюги, а саме ланцюг зворотного зв'язку відносно температури (включена до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus Journals Master List, РИНЦ).*

5. Baraniuk R. Calculation of electrothermal processes in pulse converters to provide thermal protection / R. Baraniuk, V. Todorenko, D. Ushakov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. Vol. 4, No. 8(82). – P. 19-25. *Здобувачем проведено суміщене електротеплове моделювання,*

розрахунок та проектування пристроїв теплового захисту імпульсних напівпровідникових перетворювачів (включена до міжнародних наукометричних баз SciVerse Scopus, Index Copernicus Journals Master List, Chemical Abstracts Plus, Academic Search Complete).

6. Патент України 112957 МПК G05F 1/00 (2016.01). Адаптивна система теплового захисту імпульсних перетворювачів електроенергії / Баранюк Р. А.; заявл. 23.05.2016, опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. *Здобувачем запропонована система теплового захисту імпульсних перетворювачів електроенергії, що працює за рахунок стабілізації перехідних електромагнітних процесів в колі пристрою.*

7. Баранюк Р. А. Моделювання теплових режимів роботи напівпровідникових перетворювачів електроенергії / Р. А. Баранюк // Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Електрифікація транспорту» «ТРАНСЕЛЕКТРО - 2014». – 2014. – С. 67. *Здобувачем запропоновано поєднання середовища програмування з середовищем MATLAB для розрахунку електротеплових режимів.*

8. Баранюк Р. А. Аналіз характеру перехідних процесів ключових перетворювачів електроенергії / Р. А. Баранюк, В. А. Тодоренко. // Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Електрифікація транспорту» «ТРАНСЕЛЕКТРО - 2015». – 2015. – С. 7-8. *Здобувачем побудована математична модель електротеплових процесів у вигляді рівнянь стану системи. Проведений аналіз коренів характеристичного рівняння матриць даної моделі на предмет коливальності електромагнітних процесів нагрітого перетворювача.*

АНОТАЦІЯ

Баранюк Р. А. Системи теплового захисту напівпровідникових перетворювачів електроенергії. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2017.

Дисертація присвячена розробці систем для забезпечення теплового захисту напівпровідникових перетворювачів електроенергії за рахунок суміщеного моделювання електромагнітних та теплових процесів в перетворювачах.

В роботі проведено аналіз сучасних методів розрахунку електромагнітних та теплових процесів, аналіз моделей ключових та пасивних компонентів. Показана доцільність використання моделей пасивних та активних компонентів перетворювачів параметри яких залежать від температури та електричних режимів роботи. Запропонована суміщена модель для розрахунку електротеплових процесів в перетворювачах з врахуванням швидкоплинності

процесів та розділенням на системи рівнянь, що описують швидкі та повільні процеси. Запропоновані дві системи теплового захисту, які працюють за рахунок нормалізації перехідних електромагнітних процесів в колі перетворювача з врахуванням температури компонентів та перезавантаження плавного пуску після зняття короткого замикання з програмним врахуванням температури компонентів.

Ключові слова: адаптивні системи теплового захисту, диференціальні рівняння стану системи, метод діакоптики, суміщена модель електротеплових процесів.

АННОТАЦІЯ

Баранюк Р. А. Системы тепловой защиты полупроводниковых преобразователей электроэнергии. – на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена разработке систем для обеспечения тепловой защиты полупроводниковых преобразователей электроэнергии за счет совмещенного моделирования электромагнитных и тепловых процессов в преобразователях.

В работе проведен анализ современных методов расчета электромагнитных и тепловых процессов, анализ моделей ключевых и пассивных компонентов. Показана целесообразность использования моделей пассивных и активных компонентов преобразователей, параметры которых зависят от температуры и электрических режимов работы. Предложена совмещенная модель для расчета електротепловых процессов в преобразователях с учетом скорости процессов и разделением данной системы на систему уравнений, описывающих быстрые и медленные процессы. Данная модель построена как диакоптически разделенная система уравнений, состоящая из уравнений состояния системы для медленных и быстрых процессов, а также уравнений связи. Уравнение состояния системы для электромагнитных процессов было разделено на независимую и зависимую от температуры составляющие. Проанализированы ускорения расчетного процесса с учетом чувствительности теплового движения корней характеристического уравнения матрицы коэффициентов и устойчивости метода интегрирования диакоптически разделенной системы с последующим выбором двух различных шагов интегрирования для уравнений, описывающих быстрые и медленные процессы. Данная методика была применена для создания математических моделей електротепловых процессов понижающего

широотно-импульсного преобразователя и создания совмещенной электротепловой модели в объединенных средах MATLAB/Simulink и PLECS. Проанализированы серийно выпускаемые устройства электрокоагуляционной аппаратуры на предмет тепловых аварийных режимов работы и даны рекомендации по нормализации режимов и тепловой защите. Предложены две системы тепловой защиты, которые работают за счет нормализации переходных электромагнитных процессов в цепи преобразователя с учетом температуры элементов и перезапуска плавного пуска после снятия короткого замыкания с программным учетом температуры элементов.

Предложенные системы тепловой защиты были смоделированы в средах MATLAB/Simulink и PLECS, которые показали уменьшение теплового всплеска во время переходного процесса с 180°C до 80°C при использовании системы плавного пуска с зависимой постоянной времени от температуры элементов; с 210°C до 85°C при использовании системы тепловой защиты, которая нормализует параметры пассивных элементов силовой части преобразователя при изменении их температуры.

Результаты выполненных в диссертации исследований внедрены в учебный процесс Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; при выполнении НИР «Повышение показателей энергоэффективности и ресурсосбережения средствами силовой электроники для технологии получения высоконадежных свариваемых соединений разнородных материалов» и в производство электрокоагуляторов ООО «СВАРМЕД».

Ключевые слова: адаптивные системы тепловой защиты, дифференциальные уравнения состояния системы, метод диакоптики, совмещенная модель электротепловых процессов.

SUMMARY

Baraniuk R. A. Thermal protection systems of semiconductor power converters. – Printed as manuscript.

PhD thesis in the specialty 05.09.12 – semi-conductor electric power converters. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ministry of Science and Education of Ukraine, Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to the development of thermal protection systems for semiconductor power converters due to the combined analysis of electromagnetic and thermal processes in the converters.

The analysis of modern methods of electromagnetic and thermal processes calculation, hubs and passive components modeling is made. The expediency of using models of passive and active elements of converters with thermal and electrical operating modes dependences of parameters is shown. Combined model for electrothermal processes calculating, considering the speed of processes and division of the system into systems of equations describing fast and slow processes is

proposed. Two thermal protection systems, which operate due to normalization of transient electromagnetic processes in converters and restart of smooth start after short circuit mode, considering temperature of components, are introduced.

Key words: adaptive thermal protection systems, combined model of electrothermal processes, differential system state equations, method of diacoptics.